第41卷 第8期
2024年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 8
Aug. 2024

黄河流域上游植被覆盖变化特征及其影响因素

张宏伟[1]， 别 强[1,2,3]， 石 莹[1]， 苏晓杰[1]， 李欣璋[1]

（1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730070；2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃 兰州 730070；3. 甘肃省地理国情监测实验室，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 植被覆盖度能很好的反映流域生态状况，遥感技术为大规模、高效、精准地监测植被覆盖变化提供了重要手段。本文分析了2001—2020年黄河流域上游植被覆盖度时空变化特征，利用Hurst指数与C_v系数检验其持续性、稳定性，分析气候、地形和人口对植被覆盖度变化的影响。结果表明：(1) 植被覆盖度由东北向西南递增，69.25%区域呈增长趋势。稳定区域面积占总面积的73.79%，强持续性区域面积占比为66.49%。(2) 植被覆盖度与降水正相关区域占比75.63%，与气温正相关区域占比39.28%。(3) 植被覆盖度随着高程的增加先升高后下降，与坡度呈正相关，与坡向关系不显著。(4) 植被覆盖度在人口密度为65~85人·km^{-2}与GDP为27000~37000元·km^{-2}时最高，人类活动对黄河流域上游植被覆盖变化呈现促进作用。研究结果为黄河流域上游生态高质量发展提供科学参考。

关键词： 植被覆盖度；时序变化；影响因素；黄河流域上游

植被覆盖度（Fractional Vegetation Cover，FVC）是指特定区域表面被植物覆盖的程度[1]。长时间植被变化的全面分析对于更好的了解区域生态系统平衡的调节有至关重要的意义[2]。此外，地形条件可以通过影响水文、土壤、气候等环境因素，改变植被的生长环境。黄河流域上游地形地貌复杂、生态环境脆弱，且各种影响因素对其生态环境影响也是当地政府部门和专家学者关注的热点问题之一[3]。

高思琦等[4]运用趋势分析法分析黄河源区植被覆盖度时空变化特征，指出黄河源植被覆盖度东南高西北低，变化格局为北部增加，中部减少。近年来，多位学者采用不同的方法从自然因素与人为因素对植被覆盖变化的影响进行了大量研究。自然因素方面，Wang等[5]分析了秦岭地区植被覆盖与气候因素的相关性，指出春冬季降水变化对植被生长的影响较大，而气温是影响西北地区秋冬季植被生长的重要限制因子。银朵朵等[6]通过研究内蒙古大青山地区高程、坡度和坡向对当地植被覆盖变化的影响程度，指出高程与坡度和植被覆盖变化呈正相关。人为因素方面，李辉霞等[7]分析了2001—2010年三江源地区人类活动对各类植被覆盖变化的贡献，研究发现三江源地区的植被生长在逐渐好转而且在短时间之内人类活动可以快速地影响植被覆盖变化速率。裴志林等[8]对2000—2015年黄河流域上游最大植被覆盖度的时空变化特征进行分析，并利用地理探测器模型对各种影响因素进行了定量分析，研究表明黄河上游FVC总体上以改善为主，各类影响因素中气候类环境因素>非气候类环境因素>人类活动因素。在过去的20 a中，特别是黄土高原和河套平原东部的沟壑地区，生态系统得到明显的改善和恢复[4]。因此，掌握黄河流域上游近年来的植被覆盖变化趋势、植被覆盖变化影响因素等对其未来的发展有着重要的意义。

近年来，多模态多传感器遥感技术的发展可以更加准确地获取植被覆盖度的变化信息。在实际应用中，植被覆盖度变化的研究不仅需要数据的支持，还需建立合理的模型，以确保估计植被覆盖度变化趋势的准确性。本文基于2001—2020年长时间序列的FVC数据，使用Sen+MK趋势分析黄河流域上游植被覆盖的时空变化特征，使用C_v系数和Hurst指数分析植被覆盖变化的稳定性和持续性，并基于偏相关性分析和残差分析，选取气候、地形以

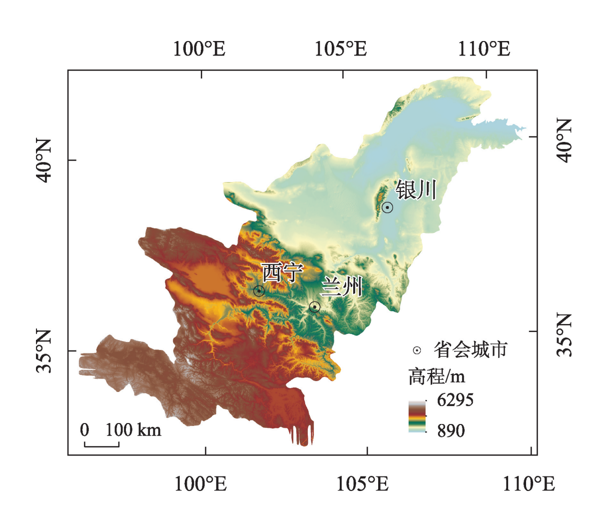
收稿日期： 2023-11-10； **修订日期：** 2024-06-07
基金项目： 国家自然科学基金青年科学基金项目(42101096)；甘肃省青年科技基金(21JR7RA341)
作者简介： 张宏伟(2001-)，男，硕士研究生，主要从事生态遥感研究. E-mail: 11230867@stu.lzjtu.edu.cn
通讯作者： 别强. E-mail: bieq@qq.com

及人类活动因素分析自然因素与人为因素的影响作用。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流域上游位于96°2′~111°15′E，32°20′~41°45′N(图1)，是指从河源至内蒙古托克托县河口村[8-9]。黄河流域上游的地形主要以高原、盆地和山地为主，地势总体上西高东低[10]，黄河流域上游地区主要气候类型为高原季风气候，其气候特点包括干燥、寒冷、多风和日照充足等。受地形等因素的影响，研究区气候时空分布差异显著[11]。黄河流域上游降水的显著特点是“降水集中、分布不均，冬干春旱、夏秋多雨”。该地区地貌类型多样，植被生长环境复杂。研究区的植被主要由高寒草甸、灌丛和高寒草原组成，这些生态系统在不同地理位置和海拔高度呈现多样化分布，特别是在流域上游的高寒地区和荒漠地带，植被类型和覆盖度会有显著差异[12]。



注：黄河流域上游矢量边界来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn)。

图1 黄河流域上游地势图

Fig. 1 Topographic map of the upper Yellow River Basin

1.2 数据来源

本研究主要使用2001—2020年美国地质勘探局(USGS)官网(https://lpdaac.usgs.gov)提供的MOD-13Q1的NDVI数据，时间分辨率为16 d，空间分辨率为250 m。使用NDVI数据计算得到FVC数据进行后续分析。用于相关性分析数据有降水数据、气温数据、DEM数据和人口与GDP数据。降水数据来自气候灾害组红外降水站数据(CHIRPS)官网，空间分辨率为1 km(https://chc.ucsb.edu)。气温数据来自ERA5_Land数据集官网，空间分辨率为1 km(https://cds.climate.copernicus.eu)。DEM数据通过地理空间数据云平台(https://www.gscloud.cn)下载，空间分辨率为30 m，利用ArcGIS对DEM数据处理得到坡度图与坡向图。人口与GDP数据来自资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI)，空间分辨率为1 km。除地形数据外，其他栅格数据统一分辨率为500 m。

1.3 研究方法

1.3.1 Sen+MK趋势分析 Sen趋势度适用于非参数趋势分析，它通过计算时间序列中每对观测值的斜率，然后取所有斜率的中值作为趋势的估计值，从而减少了对异常值的敏感性，但无法判断趋势显著性，Mann-Kendall方法无需考虑序列分布，并对异常值不敏感，因此，引入该方法可对FVC趋势进行显著性检验[13]。

Sen斜率的计算公式如下：

$$Slope = \mathrm{Median}\frac{(X_j - X_i)}{j - i} \quad (1)$$

式中：$Slope>0$表示20 a来黄河流域植被覆盖度呈上升趋势，$Slope<0$表示植被覆盖度呈下降趋势。

Mann-Kendall趋势检验还需要计算S的方差$\mathrm{Var}(S)$和标准差$\mathrm{Std}(S)$，以及S的Z值和P值，其计算公式如下：

$$\mathrm{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2)$$

$$\mathrm{Std}(S) = \mathrm{Var}(S) \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S>0 \\ 0, & S=0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S<0 \end{cases} \quad (4)$$

$$P = 2 \times \Phi(-|Z|) \quad (5)$$

式中：Φ表示标准正态分布的累积分布函数。当P值小于指定的显著性水平(通常取0.05或0.01)时，可以拒绝原假设，即认为时间序列存在显著的趋势性变化；当P值大于等于指定的显著性水平时，原假设无法被拒绝，即认为时间序列没有显著的趋势性变化。

Mann-Kendall统计量S的计算公式[14]如下：

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\operatorname{sign}(X_i-X_j) \tag{6}$$

$$\operatorname{sign}(\theta)=\begin{cases}1, & \theta>0\\ 0, & \theta=0\\ -1, & \theta<0\end{cases} \tag{7}$$

式中：X_i 和 X_j 分别表示时间序列中第 i 个和第 j 个数据点的值。Mann-Kendall统计量 S 的值越大，说明时间序列趋势越强；S 的值越小，说明时间序列趋势越弱；特别地，当 S=0时，说明时间序列不存在明显的趋势。

1.3.2　变异系数　变异系数（Coefficient of Variation）是衡量数据变异程度的统计量，通常用于比较不同数据集或同一数据集中不同变量的变异性大小，它是标准差与平均值之比[15]，其计算公式[16]如下：

$$C_v=\frac{1}{\bar{x}}\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{8}$$

式中：C_v 表示黄河流域上游的植被覆盖度的变异系数；i 为时间序列；n 为监测年数；x 为FVC的值；x_i 为第 i 年的FVC值；$\bar{x}$ 为所有年份的FVC的平均值。变异系数越大，表示相对离散程度越大，数据变异程度越大。

1.3.3　Hurst指数　Hurst指数是用来衡量时间序列长期记忆性的统计量，通常用于分析时间序列数据中是否存在趋势或周期性[17]。本文的黄河流域上游Hurst指数可以通过计算时间序列的重叠子序列平均值（R/S）统计量来估计。Hurst指数介于0~1之间[17]。当Hurst指数为0.5时，黄河流域上游植被覆盖度未来的变化与过去的变化没有关系。当Hurst指数大于0.5时，时间序列表现出一定程度的长期正相关性，即未来黄河流域上游植被覆盖度的变化与过去的变化有一定的关系。当Hurst指数小于0.5时，时间序列表现出一定程度的长期负相关性，即黄河流域上游植被覆盖度未来的变化与过去的变化有相反的趋势。

1.3.4　偏相关性分析　偏相关分析可以用于分析两个变量在控制其他变量影响后的相关关系[18]。本文用于分析黄河流域上游植被覆盖度分别与气温、降水的相关性。

偏相关系数可以通过以下公式[18]来计算：

$$R(X,Y)=\sqrt{1-(1-R_{XY}^2)(1-R_{XZ,Y}^2)} \tag{9}$$

式中：R 为因变量 X 和自变量 Y、Z 的偏相关系数，偏相关系数的取值范围为−1~1之间[19]，−1表示完全负相关，0表示不相关，1表示完全正相关。偏相关系数的正负号表示两个变量之间的关系方向，即正号表示正相关，负号表示负相关。偏相关系数的绝对值越大，说明两个变量之间的关系越密切。

1.3.5　残差分析　残差分析是目前确定人类活动对植被覆盖度影响的最有效方法之一[16]。它通过比较实际观测值与预测值之间的差异来评估模型的拟合程度和误差分布情况。本文建立植被覆盖度与气温、降水的回归模型，并拟合残差分析。

$$\sigma=\mathrm{FVC}-\mathrm{FVC}' \tag{10}$$

式中：FVC为黄河流域上游植被覆盖度的实际观测值；FVC′为利用气温、降水数据拟合而得到的黄河流域上游植被覆盖度的预测值。残差大于0时，表明人类活动对黄河流域上游植被覆盖度起到促进作用；残差小于0时，则表明人类活动对黄河流域上游植被覆盖度起到逆反作用。

1.3.6　地理探测器　地理探测器是用于分析地理现象及其驱动因素的方法[20]。本文主要用其探测对黄河上游植被覆盖度驱动力的研究分析。

2　结果与分析

2.1　植被覆盖度时空变化特征

在时间尺度上，如图2a所示，2001—2020年黄河流域上游植被覆盖度年度变化总体呈现波动上升趋势，增速为3.25%·(10a)$^{-1}$。20 a以来，2018年的植被覆盖度最高为52.06%。黄河流域治理工作一直是政府重点关注项目，全方位保护三江源区域的生态环境，并大力完善黄河流域上游生态系统建设，使黄河流域上游植被覆盖度也在不断地上升。

在空间格局上，图2b为利用Sen+MK模型分析得出的黄河流域上游植被覆盖度的变化趋势。有69.25%的黄河流域上游地区的植被覆盖度在增加，兰州、内蒙古临河市与东胜市交接地带、宁夏所在区域植被覆盖度增加较为显著。西南地区植被覆盖度较高（图2c~图2d），黄河流域上游从源头到兰州，支流较多，径流不断增大且降水量相对东北地区较高，有利于植被的生长。东北地区从兰州到河口，径流量不断减少，部分区域属于荒漠地带，相对西南地区植被覆盖较低。

2.2　植被覆盖度的稳定性与持续性

图3a为黄河流域上游植被覆盖度 C_v 系数的空

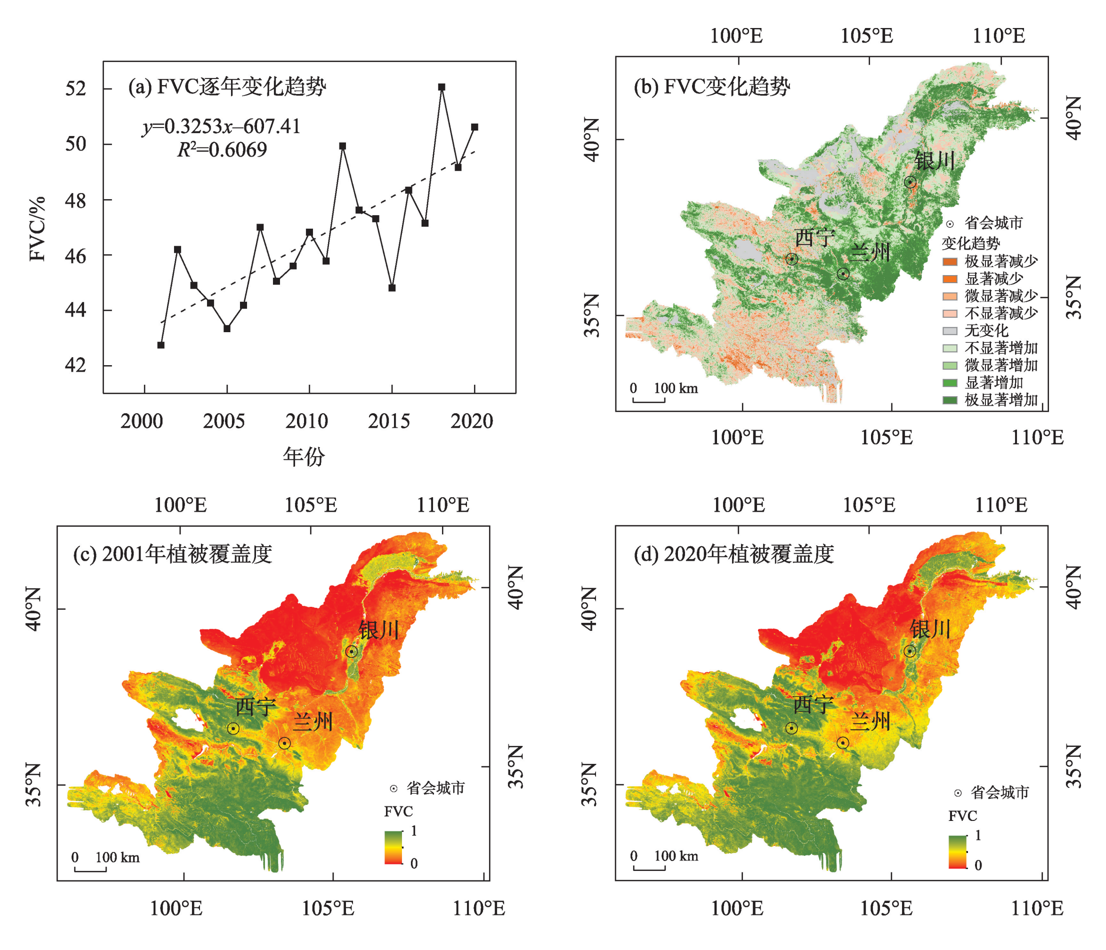


图2 黄河流域上游植被覆盖度时空变化

Fig. 2 Spatiotemporal variation of vegetation coverage in the upper reaches of the Yellow River Basin

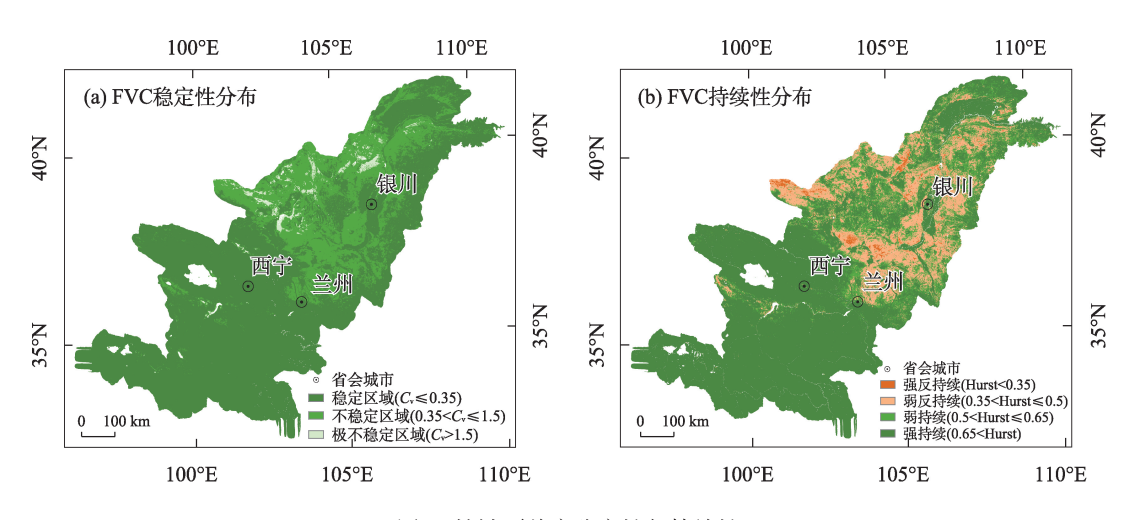


图3 植被覆盖度稳定性与持续性

Fig. 3 Stability and sustainability of vegetation coverage

间分布。黄河流域上游植被覆盖度变化以稳定为主，C_v系数在4.35之内。73.79%的区域是稳定的，主要位于青海、四川、宁夏和甘肃部分区域。黄河流域上游植被覆盖度极不稳定区域面积占比1.46%，主要分布在内蒙古区域，甘肃和宁夏的部分区域也存在不稳定区域。内蒙古与宁夏区域属于干旱半干旱气候区，降水稀少，气候干燥，而且经常受到干旱、草原火灾、沙尘暴等自然灾害的影响，导致北方地区的植被覆盖度较南方地区稳定性较低，从而这些区域的植被覆盖度也相对较低。

图3b为黄河流域上游植被覆盖度Hurst指数的空间分布。黄河流域上游植被覆盖度Hurst指数值在0.12~1之间,持续性所占比例大于反持续性占比。黄河流域上游植被覆盖度变化呈强持续性面积的占比为66.49%,呈强反持续性的占比为1.08%。

2.3 气候因素对植被覆盖度变化的驱动作用

气温与年度植被覆盖度的相关系数介于-0.89~0.86之间(图4a),黄河流域上游年度植被覆盖度与气温正相关的区域面积占总面积的39.28%,主要分布在四川和青海部分区域。这些区域海拔高、气温低、降水量高,低气温可能对植物的生长和发育产生较大的影响,然而,充足的降水为植物提供了足够的水分供应,促进植物的生长。降水与年度植被覆盖度的相关系数介于-0.88~0.95之间(图4b),黄河流域上游年度的植被覆盖度与降水的正相关区域面积占总面积的75.63%,主要分布在兰州以东、内蒙古和宁夏。这些区域海拔低、气温高、降水少。水分为植物生长的主要限制因素,这些区域降水与植被覆盖度的相关性更高。总体上,降水与植被覆盖度相关性高于气温,降水是植物生长的主要水源,对植物的光合作用和生理代谢至关重要。在干旱半干旱区,充足的降水可以提供植物所需的水分,促进植物生长,从而增加植被覆盖度。

2.4 地形因素对植被覆盖度的影响

黄河流域植被覆盖度随着高程的增加先升高再下降,呈现典型的倒"U"型分布(图5a)。首先将黄河流域上游高程从890~6295 m按550 m一个区间划分为10个等级,890~1440 m的平均植被覆盖度为22.38%,高程较低的地区,人类活动频繁并且对植被覆盖产生了一定的影响。在3640~4190 m的植被覆盖度均值为85.91%,达到峰值,高程达到5840~6295 m处基本无植被覆盖,高海拔地区通常气温比较低、降水较少、气候干燥从而不利于植被的生长。

图5b为黄河流域上游植被覆盖度随坡度的变化,坡度等级为平地(0°~5°)、缓坡(5°~15°)、斜坡(15°~25°)、陡坡(>25°)。黄河流域上游植被覆盖度最高的区域为陡坡,为69.04%。黄河流域上游较为平坦的地区一方面人类活动较多,另一方面存在沙漠化地区,植被覆盖度相对与坡度高的地区较低。随着黄河流域上游地区坡度的升高,耕地较少,草地和林地占比相对较多,植被覆盖度也随之上升。

图5c为黄河流域上游植被覆盖度随着坡向的变化,坡向等级为阴坡(1°~45°/315°~360°)、半阴坡(45°~135°)、阳坡(135°~225°)、半阳坡(225°~315°)。黄河流域上游半阴坡区域的植被覆盖度均值最高,为47.72%。各个坡向的植被覆盖度差异不大,因此,坡向对黄河流域上游植被覆盖度的影响较小。

2.5 人为因素对植被覆盖度变化的驱动作用

图6a为黄河流域上游植被覆盖度随人口密度的变化,本文按自然间断点分级法将人口密度划分为10个等级,人口密度为10~20人·km^{-2}的地区植被覆盖度均值最大,为53.70%,人口密度为65~85人·km^{-2}的植被覆盖度最小为25.81%,植被覆盖度均值在85人·km^{-2}时出现转折并升高。人口主要分布在黄河上游两岸地区,主要集中在兰州市、银川市和西宁市等地区,乡村地区的人口密度相对较小。人口

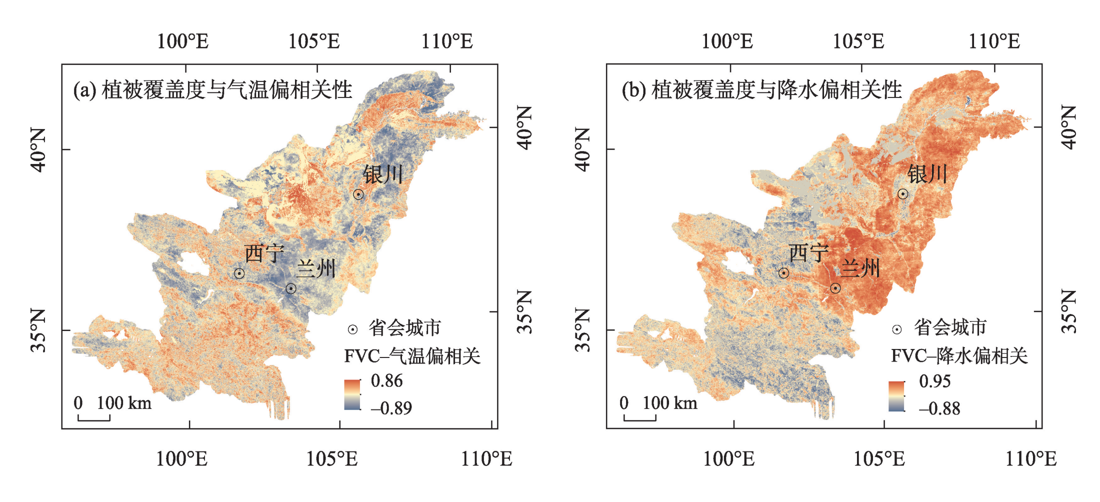


图4 黄河流域上游年度植被覆盖度与气候的偏相关系数的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the partial correlation coefficient between annual vegetation coverage and climate in the upper reaches of the Yellow River Basin

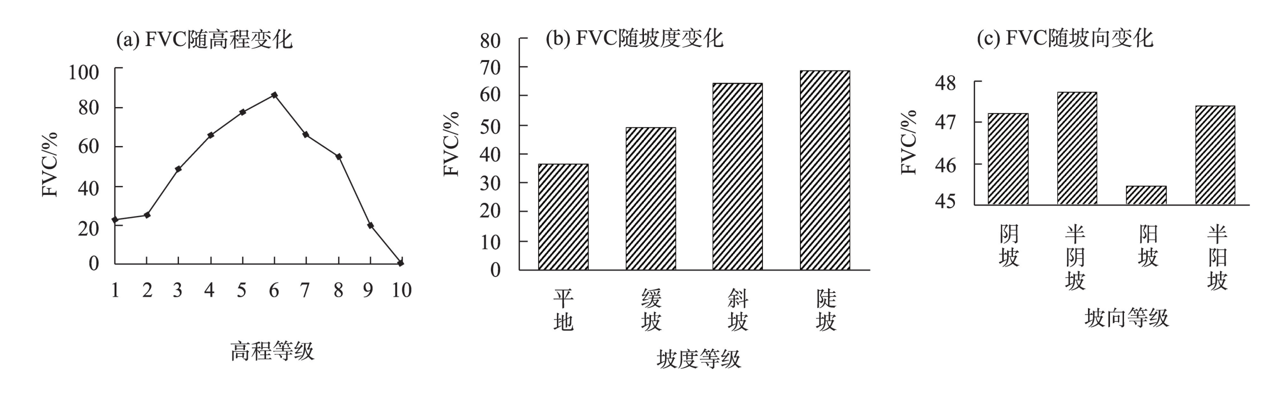


图5 黄河流域上游植被覆盖度随地形因素变化

Fig. 5 Variation of vegetation coverage with topographic factors in the upper reaches of the Yellow River Basin

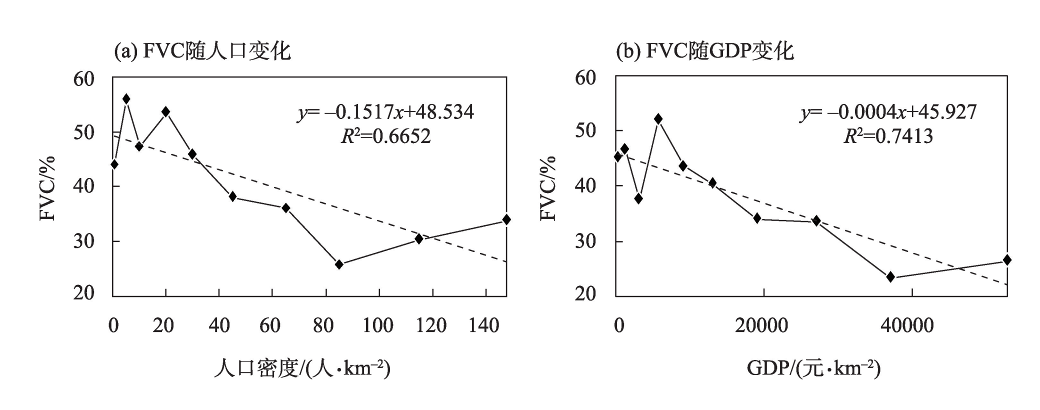


图6 黄河流域上游植被覆盖度随人口与GDP变化

Fig. 6 Changes of vegetation coverage with population and GDP in the upper reaches of the Yellow River Basin

密度的增加可能会导致土地利用方式的改变,比如增加农田和城市建设用地等使得植被覆盖发生变化。

图6b为黄河流域上游植被覆盖度随GDP的变化。本文将GDP按自然间断点分级法划分为10个等级,GDP在3100~5700元·km^{-2}的平均植被覆盖度最高为52.06%,GDP在27000~37000元·km^{-2}的平均植被覆盖度最低为23.56%,平均植被覆盖度在37000元·km^{-2}时转折升高。高GDP区域主要集中在西宁市、兰州市和银川市等地区,在大多县区的GDP都相对较低。一方面,经济发展可能会导致土地利用方式的改变。另一方面,经济发展也可能会带动环保意识的提高和环境保护投入的增加,从而促进植被的恢复和保护。

2002年、2007年、2010—2013年、2016—2020年的植被覆盖度残差值为正(图7a),人类活动对植被覆盖度起促进作用且使植被覆盖度增加。2001年、2003—2006年、2008—2009年、2014—2015年的植被覆盖度残差值为负,人类活动对植被覆盖度起抑制作用且使植被覆盖度减少。总体上,这些年政府加大力度对黄河流域上游生态环境进行保护,通过人工种植森林以及对原有植被采取一定的保护措施使得植被覆盖度有所增加。

2001—2020年黄河流域上游残差趋势在-0.04~0.05之间(图7b),整体上,人类活动对黄河流域上游植被覆盖变化起到促进作用,人类活动对黄河流域植被覆盖度变化起到促进作用面积占黄河流域上游总面积的70.64%,主要分布在甘肃省、宁夏省、青海省东部区域和内蒙古东部区域。人类活动对黄河流域植被覆盖度起到抑制作用面积占黄河流域上游总面积的29.36%,主要分布在青海和内蒙古部分区域,这两个地区属于畜牧业发达地区,放牧活动可能对植被造成过度的压力。过度放牧会导致植被过度利用,无法充分恢复,从而抑制植被的增长。

3 讨论

本文研究结果显示,2001—2020年黄河流域上游植被覆盖度呈上升趋势,这一结果与李雪银等[19]

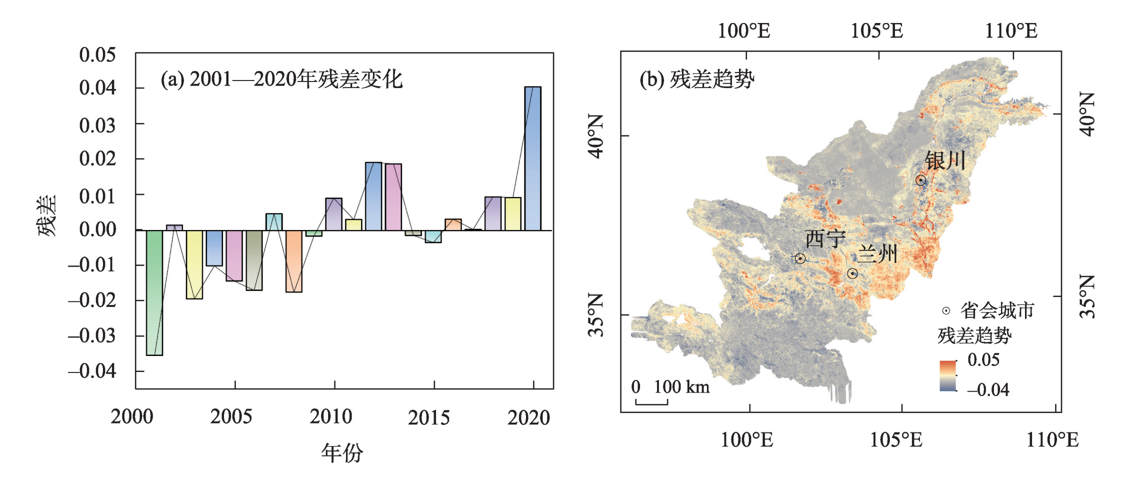


图7 黄河流域上游植被覆盖度残差时空变化趋势

Fig. 7 Spatio-temporal trend of vegetation cover residuals in the upper reaches of the Yellow River Basin

对黄河流域的研究一致。黄河流域上游生态工程的实施使得原先通过砍伐森林扩大耕地面积的现象已得到根本逆转,自然植被呈现显著恢复的趋势[21]。空间分布上,西南地区的植被覆盖度高于东北地区,与裴志林等[8]对黄河上游植被覆盖度空间分布分析一致。兰州东南部植被覆盖增加明显,可能与退耕还林还草等生态保护措施有关。

气候变化和人类活动共同作用是黄河流域上游植被覆盖变化的原因,研究表明,降水与植被覆盖度的相关性高于气温,这与刘海等[22]分析气候变化对黄河流域植被覆盖变化的影响结论一致,降水是影响区域自然植被最主要的限制因素。黄河流域上游处于干旱半干旱地区,相关研究表明[23],气候的湿润度在干旱半干旱地区对植被覆盖度的变化有较大的影响,湿润度越高,植被覆盖度越高。坡度影响着植被的空间分布及生长,普遍认为坡度低的区域有利于农业种植而且低植被区域易受到人类活动的影响[24]。研究中发现,在3600~4150 m的植被覆盖度均值达到峰值,此外,高程较低的地区,人类活动频繁并且对植被覆盖产生了一定的影响。在分析黄河流域上游植被覆盖度在坡向上的差异时发现,虽然,植被覆盖变化在不同坡向上存在一定差异,但变化幅度不明显。这与张兴航等[25]研究结果一致。

人类活动对黄河流域植被覆盖有促进作用的地区分布在黄河流域东部地区,人类活动逐渐对植被覆盖度变化起到促进作用,与王成龙等[26]的研究结果一致。国家已设立三江源国家公园,建立区域保护区,实施天然林牧保护、退耕还林、休牧育草等生态工程和部分生态补偿政策等[27],使三江源区生态环境得到进一步恢复。人类的保护与治理在区域植被生长恢复中逐步起到促进作用[28]。本文在对植被覆盖度的影响因素研究时,只考虑了气候、地形及人为因素,未考虑土地利用等其他影响因素,在后续的研究中,可以深入分析各类因素与植被覆盖的响应程度。

利用地理探测器分析黄河流域上游植被覆盖度时空变化驱动力,分析各驱动因素之间的交互关系。表1单因子探测结果表明,除坡向外,其余各驱动因子对植被覆盖度的影响均具有显著性,其中,降水是引起黄河上游植被覆盖度变化的首要因子。图8交互作用探测表明,影响程度较高的交互因子有气温∩降水(0.7195)、GDP∩降水(0.7062)、DEM∩降水(0.7020),降水对植被覆盖度的影响程

表1 驱动因子解释力

Tab. 1 Explanatory power of driving factors

	降水	气温	DEM	坡度	坡向	人口	GDP
q	0.6712	0.5591	0.5755	0.1773	0.0011	0.0147	0.0624
P	0	0	0	0	0.3995	0	0

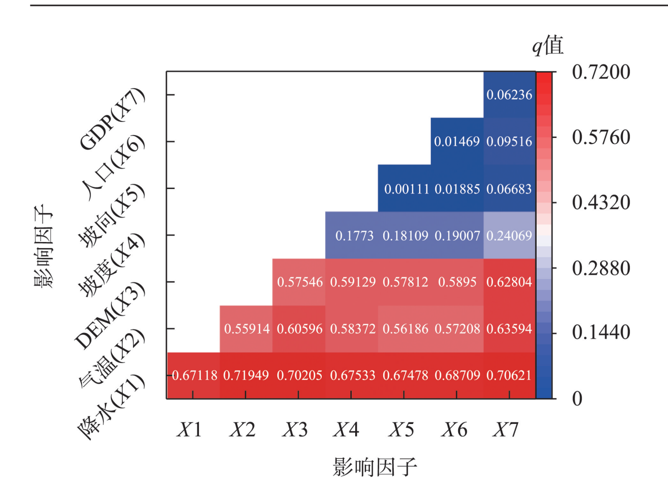


图8 驱动因子交互探测解释力

Fig. 8 Explanatory power of the driving factor is cross-probed

度占据主导地位。

4 结 论

本文基于黄河流域上游的MODIS NDVI数据、气候、地形和人口数据，采用Sen+MK趋势检验、C_v系数、Hurst指数、偏相关性分析和残差分析，研究了2001—2020年黄河流域上游植被覆盖变化趋势及其影响因素。结论如下：

（1）2001—2020年黄河流域上游的植被覆盖度逐渐增加，空间分布呈现东南高，西北低的格局。黄河流域上游植被覆盖度稳定性区域面积占比最高，强持续性区域面积占比最高。

（2）黄河流域上游年度的植被覆盖度与气温的正相关区域面积占总面积的39.28%，与降水的正相关区域面积占总面积的75.63%。

（3）黄河流域植被覆盖度随着高程的增加先升高再下降，呈现典型的倒"U"型分布，在3600~4150 m的平均植被覆盖度（85.91%）达到最高。黄河流域上游的植被覆盖度随着坡度的上升也在逐渐上升，陡坡区域的平均植被覆盖度（69.04%）达到最高。半阴坡区域的平均植被覆盖度（47.72%）占比最高。

（4）黄河流域上游人口密度在65~85人·km^{-2}时平均植被覆盖度最高且GDP在27000~37000元·km^{-2}时平均植被覆盖度最高。在2010年之前主要以人类活动对植被覆盖度的抑制作用为主，在2010年之后主要以人类活动对植被覆盖度的促进作用为主，20 a以来，人类活动对黄河流域上游植被覆盖变化起到促进作用。

黄河流域上游的植被具有很好的水土保持能力，可以有效防止土壤的流失和沙漠化的发生，保障土地的质量和产量。同时，植被可以吸收和存储水分，对于水资源的保护和管理具有重要作用，保障人民的生命财产安全。

参考文献（References）：

[1] 吴加敏, 蔡创创, 孙灏, 等. 宁夏沿黄城市带植被覆盖时空演变及其驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 696−705. [Wu Jiamin, Cai Chuangchuang, Sun Hao, et al. Spatiotemporal evolution and driving force analysis of fractional vegetation coverage over the urban belt along the Yellow River in Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 696−705.]

[2] Huang Chenlu, Xu Juan, Shan Linxin. Long-term variability of vegetation cover and its driving factors and effects over the Zuli River Basin in Northwest China[J]. Sustainability, 2023, 15(3): 1829.

[3] 周喆, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 基于GEE的黄河上游生态环境质量动态监测与评价：以龙羊峡至积石峡段为例[J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2545−2554. [Zhou Zhe, Hu Xiasong, Liu Changyi, et al. Dynamic monitoring and evaluation of eco-environmental quality in the upper reaches of the Yellow River based on GEE: A case study of the section from Longyang Gorge to Jishi Gorge[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2545−2554.]

[4] 高思琦, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 黄河源植被覆盖度变化及空间分布自然驱动力分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(3): 429−439. [Gao Siqi, Dong Guotao, Jiang Xiaohui, et al. Analysis of vegetation coverage changes and natural driving forces of spatial distribution in the source region of the Yellow River[J]. Ecology and Environment, 2022, 31(3): 429−439.]

[5] Wang B, Xu G, Li P, et al. Vegetation dynamics and their relationships with climatic factors in the Qinling Mountains of China[J]. Ecological Indicators, 2020, 108: 105719.

[6] 银朵朵, 王艳慧. 温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1158−1167. [Yin Duoduo, Wang Yanhui. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and its topographic differentiation in temperate continental semi-arid monsoon climate region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1158−1167.]

[7] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5495−5504. [Li Huixia, Liu Guohua, Fu Bojie. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5495−5504.]

[8] 裴志林, 杨勤科, 王春梅, 等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 546−555. [Pei

Zhilin, Yang Qinke, Wang Chunmei, et al. Spatial distribution of vegetation coverage and its affecting factors in the upper reaches of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 546-555.]

[9] 吴成永, 曹广超, 陈克龙, 等. 黄河上游地区土壤保持服务时空变化及归因[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 143-150. [Wu Chengyong, Cao Guangchao, Chen Kelong, et al. Spatio-temporal variation in soil conservation service and its influencing factors in the upper reaches of the Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 143-150.]

[10] 杜加强, 郭杨, 房孝磊, 等. 近50 a黄河上游气候变化趋势和干湿界线波动分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 291-298. [Du Jiaqiang, Guo Yang, Fang Xiaolei, et al. On the climate change and fluctuation of climate boundaries in the headwaters of the Yellow River Basin in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(2): 291-298.]

[11] 曹莹. 黄河上游水源涵养区植被恢复合理目标及固碳提升潜力研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023. [Cao Ying. Study on Reasonable Target of Vegetation Restoration and Potential Improvement of Carbon Sequestration in a Water Conservation Area of the Upper Yellow River Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.]

[12] 董晓雪. 黄河上游植被长期格局变化、成因及其对水文过程的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2021. [Dong Xiaoxue. Long-Term Vegetation Pattern Change, Cause of Formation and Its Influence on Hydrological Process in the Upper Yellow River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.]

[13] 王欣毅, 杨洁, 林良国, 等. 基于Sen+Mann-Kendall陕西省植被覆盖度时空变化规律研究[J]. 农业与技术, 2023, 43(7): 62-66. [Wang Xinyi, Yang Jie, Lin Liangguo, et al. Study on the spatio-temporal variation of vegetation coverage in Shaanxi Province based on Sen+Mann-Kendall[J]. Agriculture and Technology, 2023, 43(7): 62-66.]

[14] 李朋轩. 渭河流域植被动态监测与驱动力分析[J/OL]. 自然资源信息化: 1-6[2024-07-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1797.N.20240312.1433.004.html. [Li Pengxuan. Vegetation dynamics monitoring and driving force analysis in the Weihe River basin[J/OL]. Natural Resources Informatization: 1-6 [2024-07-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1797.N.20240312.1433.004.html.]

[15] 徐豪. 陕西省区域经济发展差异分析——基于变异系数与Theil指数[J]. 全国流通经济, 2022(10): 24-27. [Xu Hao. Analysis on the differences of regional economic development in Shaanxi Province: Based on the coefficient of variation and theil index[J]. National Circulation Economy, 2022(10): 24-27.]

[16] 佘洁, 佘璐, 沈爱红, 等. 宁夏沿黄城市带植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J/OL]. 环境科学, 1-28 [2024-07-05]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202311059. [She Jie, She Lu, Shen Aihong, et al. Spatiotemporal changes and driving force analysis of vegetation cover in the urban belt along the Yellow River in Ningxia[J/OL]. Environmental Science, 1-28 [2024-07-05]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202311059.]

[17] 刘明霞. 赣江上游流域植被覆盖度变化及其驱动因素研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022. [Liu Mingxia. Study on the Change of Vegetation Coverage and Its Driving Factors in the Upper Reaches of Ganjiang River Basin[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.]

[18] 姚楠, 董国涛, 薛华柱. 基于Google Earth Engine的黄土高原植被覆盖度时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 260-268. [Yao Nan, Dong Guotao, Xue Huazhu. Analysis on the characteristics of the spatiotemporal change in vegetation coverage on the Loess Plateau using the Google Earth Engine[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 260-268.]

[19] 李雪银, 张志强, 孙爱芝. 1982—2021年黄河流域植被覆盖时空演变及影响因素研究[J]. 地球环境学报, 2022, 13(4): 428-436. [Li Xueyin, Zhang Zhiqiang, Sun Aizhi. Study on the spatial-temporal evolution and influence factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin during 1982-2021[J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(4): 428-436.]

[20] 赵东颖, 蒙仲举, 孟芮冰, 等. 乌兰布和沙漠风沙入黄段植被覆盖动态变化特征及驱动力[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 639-649. [Zhao Dongying, Meng Zhongju, Meng Ruibing, et al. Dynamic change characteristics and driving forces of vegetation cover in the Ulan Buhe Desert along the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 639-649.]

[21] Li S, Yang S, Liu X, et al. NDVI-Based Analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, Central China[J]. Remote Sensing, 2015, 7(9): 11163-11182.

[22] 刘海, 刘凤, 郑粮. 气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 143-151. [Liu Hai, Liu Feng, Zheng Liang. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 143-151.]

[23] 李自闯, 董国涛, 姚楠. 1982—2015年黄河中游NDVI时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 202-210. [Li Zichuang, Dong Guotao, Yao Nan. Analysis of spatiotemporal variations and driving forces of NDVI in the middle reaches of Yellow River during 1982-2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 202-210.]

[24] 王晓蕾, 石守海. 基于GEE的黄河流域植被时空变化及其地形效应研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(6): 1087-1098. [Wang Xiaolei, Shi Shouhai. Spatio-temporal changes of vegetation in the Yellow River Basin and related effect of landform based on GEE[J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24(6): 1087-1098.]

[25] 张兴航, 张百平, 王晶, 等. 神农架林区植被分布与地形的关系研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 482-493. [Zhang Xinghang, Zhang Baiping, Wang Jing, et al. Study on the relationship between terrain and distribution of the vegetation in Shennongjia forestry district[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22

(3): 482−493.]

[26] 王成龙, 王秀艳, 李佳霖, 等. 1981—2019年黄河流域植被时空演变格局及影响因子分析[J]. 测绘科学, 2023, 48(10): 136−146. [Wang Chenglong, Wang Xiuyan, Li Jialin, et al. Spatio-temporal change patterns and its influencing factors of vegetation in the Yellow River Basin from 1981 to 2019[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(10): 136−146.]

[27] 谢绮丽, 杨鑫, 郝利娜. 2001—2020年三江源区植被覆盖时空变化特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 202−212. [Xie Qili, Yang Xin, Hao Lina. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its driving factors in Three-River headwaters region during 2001−2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 202−212.]

[28] 张乐艺, 李霞, 冯京辉, 等. 2000—2018年黄河流域NDVI时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 276−286. [Zhang Leyi, Li Xia, Feng Jinghui, et al. Spatial-temporal changes of NDVI in Yellow River basin and its dual response to climate change and human activities during 2000−2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 276−286.]

Characteristics of vegetation cover changes in the upper reaches of the Yellow River Basin and the influencing factors

ZHANG Hongwei[1], BIE Qiang[1,2,3], SHI Ying[1], SU Xiaojie[1], LI Xinzhang[1]

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Geographical Monitoring Technology Application, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Gansu Engineering Laboratory of Geographical Conditions Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Vegetation coverage provides a good reflection of the ecological status of the watershed, and remote sensing technology is important for the large-scale, efficient, and accurate monitoring of changes in vegetation coverage. This study examined the temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage in the upper reaches of the Yellow River Basin from 2001 to 2020, using the Hurst index and C_v coefficient to test persistence and stability. The effects of climate, topography, and population on changes in vegetation coverage were analyzed. The results showed that the vegetation coverage increased from northeast to southwest, with an increasing trend in 69.25% of the areas. Stable areas accounted for 73.79% of the total area, and areas of strong sustainability accounted for 66.49%. (2) Of the total area, 75.63% was positively correlated with precipitation and 39.28% was positively correlated with temperature. (3) As elevation increased, vegetation coverage first increased and then decreased; coverage was positively correlated with slope but not significantly related to aspect. (4) The vegetation coverage was highest when the population density was 65−85 individuals·km^{-2} and the GDP was 27000−37000 yuan·km^{-2}, indicating that human activities promoted changes in the vegetation cover in the upper reaches of the Yellow River Basin. The results of this study provide a scientific reference to support the high-quality ecological development of the upper reaches of the Yellow River Basin.

Keywords: fractional vegetation cover; temporal change; influencing factors; upper Yellow River Basin